

М/32206

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

С. С. ДМИТРИЧЕНКО
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

М

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
НЕСУЩИХ СИСТЕМ ТРАКТОРОВ И ДРУГИХ МАШИН**

(05.195. Автомобили и тракторы)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



1132206

Дмитриченко С.С. Методы

Работа выполнена в Государственном союзном научно-исследовательском тракторном институте (НАТИ).

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Барский И. Б.,
доктор технических наук, профессор Когаев В. П.,
доктор технических наук, профессор Светлицкий В. А.

Ведущее предприятие — Харьковский дважды ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени тракторный завод им. С. Орджоникидзе.

Автореферат разослан «...» апреля 1971 г.

Защита диссертации
Ученого Совета
МВТУ им.
2-я Бауманская

С диссертации
им. Н. Э. Баумана

Ваши отзывы
ренные печатью,

Ученый секретарь

к. т. н., до

1132206

эксплуатационных условиях и усталостные испытания более 250 рам на треках полигонов и стендах. Теоретическая часть диссертации заключается в разработке или совершенствовании ряда методических вопросов оценки эксплуатационной нагруженности и усталостной долговечности деталей на основе аппарата теории вероятностей.

ГЛАВА I. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Изучению прочности рам посвящено большое количество отечественных и зарубежных работ. Повышенный интерес к этому вопросу в течение последних 30 лет объясняется тем, что от работоспособности рам существенно зависят производительность, долговечность, безопасность движения и другие эксплуатационные качества машин. Расчетам статической прочности рам в СССР посвящены работы И.М.Рабиновича, А.А.Уманского, Б.Н.Горбунова, А.И.Стрельбицкой, Д.В.Бычкова, И.В.Урбана, С.Д.Пономарева, В.Л.Бидермана, Е.А.Чудакова, М.К.Кристи, Э.Н.Козака, И.К.Снитко, С.И.Котляра, Д.Б.Гельфгата, Н.Ф.Бочарова, А.А.Лапина, В.А.Ошнокова, П.И.Сорокина, Н.И.Гриненко, М.Б.Школьников, М.Н.Закса, А.П.Матвеева, В.П.Копрова, А.П.Мельчакова и др., за рубежом — К.Эрца, М.Бенцини, И.Дойча, М.Ханке, К.Швабенлендера, С.Шомбергера, Л.Ричарда и др.

Усталостная прочность рам и других сложных металлоконструкций изучалась в СССР Г.А.Николаевым, Б.Н.Горбуновым, Л.Н.Никольским, Г.В.Раевским, А.Е.Аснисом, М.М.Гохбергом, В.И.Труфяковым, Н.Н.Невзоровой, Л.А.Шадуrom, Н.И.Григорьевым, А.М.Пеньковым, Ю.С.Урбанским, А.И.Радченко, Г.Д.Грингаузом, Н.Ф.Редковцом, М.Э.Гарфом, Э.Я.Филатовым, Е.Г.Бутловым, А.Г.Гасановым, М.М.Кобриным, Л.М.Лельчуком, Г.В.Девойно, А.И.Шевченко, Г.Г.Батовневым, В.Г.Нейченко, В.А.Трофимовым, Р.В.Нерсисяном, Н.Н.Яценко, К.М.Атояном, Р.А.Аколяном, В.Б.Проскуряковым, П.М.Волковым, С.Б.Кипнис, В.И.Корешковым, А.Н.Савоськиным, В.В.Кузьменко, Б.Н.Покровским, В.И.Перепоновым, Б.А.Мейснером, В.Н.Белоусовым, В.И.Песковым и др., за рубежом — Э.Эссерсом, Ф.Мэйном, А.Клоссом, В.Макконнелом, Я.Ямамото, Р.Бьюкейсом, Р.Соренсоном, Дж. Гешелином, Е.Гасснером, Б.Лундбергом и др. На основе обзора сделаны следующие выводы:

1. Исследования статической прочности позволяют лишь в первом приближении выявить наиболее нагруженные места конструкций, выбрать размеры сечений элементов и соотношения их жесткостей, поскольку в расчетах реальные нагрузки, действующие на раму со стороны других узлов машины, груза и микропрофиля пути, либо совсем не учитываются, либо учитываются косвенно — в виде динамических коэффициентов.

2. Недостаточно разработаны следующие вопросы оценки эксплуатационного ресурса рам: оптимальные методы схематизации случайных процессов нагружения; методы расчета долговечности на основе суммирования усталостных повреждений; длительность регистрации процессов нагружения; методы прогноза среднего и гамма-процентного ресурса; выбор режимов и методов ускоренных ресурсных испытаний металлоконструкций мобильных машин.

3. Конструкции узлов соединения поперечин и лонжеронов рам проанализированы с позиций усталостной прочности недостаточно. Ряд рекомендаций по конструированию рам ошибочен. Необходима разработка рекомендаций об оптимальных конструкциях рам с учетом современного общего направления применения сварки вместо клепки.

4. Необходимым условием создания долговечных несущих систем машин при минимальной металлоемкости является проведение комплекса исследований, включающего как этапы расчетов, так и этапы ресурсных испытаний.

ГЛАВА 2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

По результатам исследований И.А.Одинга, В.Вейбулла, Е.Орвана, Н.Н.Афанасьева, С.Д.Волкова, В.С.Ивановой, В.Т.Трощенко и др. отмечено, что формулы, основанные на энергетических представлениях о природе усталости, дают хорошее приближение к результатам испытаний на усталость при постоянных амплитудах напряжений. Для применения энергетических теорий в расчетах долговечности деталей при реальных случайных процессах нагружения необходимо дальнейшее накопление экспериментальных данных.

Рассмотрены работы по изучению феноменологических гипотез суммирования усталостных повреждений, в том числе работы А.Пальмгрена, А.Фореста, Б.Лангера, М.Майнера, Д.Н.Решетова, В.М.Бахарева, С.В.Серенсена, В.П.Когаева и др. — по линейному суммированию; А.Фрейденталля, Р.Геллера, Г.Кортена, Т.Долана, Дж.Майлоа, С.В.Серенсена, Л.А.Козлова — по методам расчетной кривой усталости; Д.Генри, Р.Геттса, С.Мэнсона, А.Нахтигалла, Дж.Фреча, С.В.Серенсена, В.П.Когаева, М.Э.Гарфа, В.Э.Павловского, Б.Э.Слобина и др. — по методам учета изменения кривых усталости по мере накопления повреждений; В.Вейбулла, А.Фрейденталля, Г.Кортена, Т.Долана, Т.Нишихары, Т.Ямады, Ф.Шенли, В.В.Болотина, Х.Б.Кордонского, Б.Е.Корсакова и др. — по нелинейному суммированию. Ни одна из рассмотренных групп гипотез не является универсальной, охватывающей все варианты инженерных расчетов долговечности деталей. На основании большого числа опытных данных при многократных изменениях амплитуд напряжений находит широкое применение

линейное суммирование (в частности, с корректировкой нижнего предела суммирования и суммы относительных долговечностей).

Применимость линейного суммирования к сложным сварным конструкциям типа рам изучена недостаточно. Проверка такой применимости на натуральных конструкциях позволит учесть большое число факторов и их сочетаний (порядка нескольких десятков), по-разному влияющих на накопление повреждений (в отличие от проверки на лабораторных образцах, при которой круг влияющих факторов, как правило, сводится к минимуму). Не исключено, что суммарное влияние многочисленных факторов на натуральных сварных конструкциях может приводить к накоплению повреждений по закону, близкому к линейному.

Для описания кривых усталости используется большое число уравнений. Рассмотрен совместно с Ю.С.Борисовым и Ю.Н.Благовещенским вопрос о том, какое из наиболее распространенных уравнений – степенное или экспоненциальное – применять в прикладных задачах усталости. Определена величина ошибки, получаемой при замене степенного уравнения экспоненциальным (в случае построения кривых усталости на основе одних и тех же экспериментальных данных). Для 10000 смоделированных методом Монте-Карло кривых усталости получено, что в 95% случаев относительная ошибка логарифмов долговечности не превышает 0,03, а в 99% случаев – не превышает 0,05. Такие же результаты достигнуты и при решении обратной задачи.

Подсчитаны также относительные ошибки расчетной величины накопленного повреждения при моделировании кривых усталости и распределений амплитуд напряжений методом Монте-Карло. Установлено, что различие долговечностей по исходным кривым усталости в полулогарифмической и двойной логарифмической системах координат влияет на расчетную величину повреждения (при использовании линейной гипотезы суммирования) в большинстве случаев несущественно. Так, для 90% случаев величина относительной ошибки не превышает 0,2. Расчет долговечности можно вести, пользуясь любым из рассмотренных уравнений.

ГЛАВА 3. ОСНОВЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ НАГРУЖЕННОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

Рассмотрены основные методические вопросы использования аппарата теории вероятностей в задачах оценки нагруженности, прогноза долговечности, обоснования режимов ускоренных ресурсных испытаний, количественной характеристики условий использования машин, установления закономерностей изменения нагруженности деталей в зависимости от различных эксплуатационных факторов и др. Правила вычислений и

графического представления статистических характеристик рассмотрены на примерах, взятых из практики решения инженерных задач. В частности, проанализированы особенности вычисления характеристик распределений амплитуд напряжений при различных методах схематизации случайных процессов нагружения.

В настоящее время при решении статистических задач усталостной прочности и оценки нагруженности деталей различными авторами применяется неоправданно большое число (несколько десятков) теоретических распределений, причем в большинстве случаев их выбор не обосновывается физической сущностью рассматриваемых процессов, а критерии выбора носят формальный характер. Показано, что при схематизации процессов нагружения методами размахов и укрупненных размахов эмпирические распределения амплитуд напряжений в подавляющем большинстве случаев не противоречат логарифмически нормальному закону, а при схематизации методами экстремумов и максимумов — не противоречат нормальному закону.

Отмечено, что при неограниченном увеличении объема ряда выбор закона распределения затрудняется тем, что всегда присутствуют флуктуации частот и их величины не могут быть меньше некоторого значения, определяемого, например, самой природой временного колебания условий эксперимента. Однако статистические критерии (Колмогорова, Пирсона и др.), начиная с некоторого объема ряда, чувствительны к сколь угодно малым флуктуациям выборочного распределения около ожидаемой функции, что приводит к отвержению гипотезы, даже при ее полной практической пригодности. Поэтому чисто визуальное определение близости экспериментального и теоретического распределений на графике при больших объемах ряда может оказаться не только наиболее полезным, но и единственным в настоящее время критерием согласия.

ГЛАВА 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЖЕННОСТИ

Для количественной характеристики нагруженности деталей на основе статистического анализа измерялись следующие параметры нагружения: напряжения в элементах конструкций; вертикальные и горизонтальные (продольные и боковые) нагрузки на опорных цапфах и осях; прогибы рессор; углы закручивания рам; вертикальные и поперечные ускорения поддрессоренных и неподдрессоренных масс; нагрузки в сцепных устройствах и др. Напряжения измерялись на всех объектах исследований, а остальные параметры — на 8 моделях колесных и гусенич-

ных машин. Регистрации напряжений отдавалось предпочтение потому, что в результате их измерения представлялось возможным решать большинство задач статистического анализа нагруженности деталей (в том числе прогнозировать ресурс).

Экспериментальные исследования нагруженности проведены на 82 опытных и серийных моделях несущих систем 52 марок машин: гусеничных и колесных тракторов различного назначения (сельскохозяйственных, промышленных, трелевочных), универсальных самоходных шасси, грузовых автомобилей, прицепов и полуприцепов. Изучен широкий класс машин по параметрам, схемам и конструкциям подрессоривания.

Рассмотрены особенности конструкций типичных рам мобильных машин, отмечены прогрессивные тенденции в конструировании узлов соединения лонжеронов и поперечин, в том числе применение стыковых соединений замкнутых профилей. Установлено, что в подавляющем большинстве случаев эксплуатационные повреждения рам носят усталостный характер. Приведены примеры распределений эксплуатационного ресурса узлов.

Эксперименты проведены с применением тензодатчиков сопротивления и самоходных тензометрических лабораторий НАТИ. Для измерения нагрузок использованы способы измерения сил независимо от места их приложения. Напряжения в основных элементах несущих систем измерялись при движении машин в типичных эксплуатационных условиях и в условиях полигона. Существенное уменьшение трудоемкости экспериментов достигнуто благодаря применению ряда методических приемов и упрощений (в том числе порядок опытов от более тяжелых условий к менее тяжелым условиям, позволяющий поэтапно снижать количество точек замеров).

Выбор мест расположения тензодатчиков основывался на данных об эксплуатационных разрушениях и расчетной оценке уровня ожидаемых напряжений. На деталях, имеющих открытые профили, датчики размещались вдоль краев полок и стенок. На закрытых профилях для замера главных напряжений наклеивались розетки датчиков. В отдельных случаях на закрытых профилях датчики ориентировались перпендикулярно траекториям ожидаемых трещин. На сварных и клепаных конструкциях датчики располагались по отношению к источникам концентрации напряжений в тех же местах, что и при определении характеристик сопротивления усталости.

Основой программ тензометрических опытов являлись результаты статистического изучения использования машин в эксплуатации. Например, применительно к оценке нагруженности несущих систем гусеничных тракторов класса 3 т с учетом работ Р.В.Кутеля, И.И.Трепененкова,

Ю.К.Киртобая, Э.Я.Филатова, В.Г.Нейченко и др. все виды сельскохозяйственных работ укрупненно разбиты на три основных вида: 1) пахота; 2) подготовка почвы к посеву, посев, уход за посевами, уборка; 3) транспортные работы. Для 9 природно-климатических зон страны получены статистические характеристики использования тракторов: средние значения пройденного пути в км при пахоте вдоль и поперек борозд, при транспортном движении по дорогам в удовлетворительном и плохом состоянии и т.п., а также средние значения количества кратковременных операций (крутых поворотов, заглублений-выглублений навесного плуга, поворотов с заглубленным плугом) за 1000 часов работы.

При выборе длительности тензометрирования учитывалось количество типичных эксплуатационных режимов нагружения конструкций и заданная точность получаемых данных. Микропрофили отдельных видов дорог и напряжения записывались на участках длиной до 5000 м. Устойчивость статистических параметров переменной напряженности оценивалась различными методами. 10-процентная относительная погрешность среднеквадратичных отклонений распределений амплитуд напряжений достигается при длине дорог 1000-1500 м, полей - 500 м.

ГЛАВА 5. СХЕМАТИЗАЦИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ НАГРУЖЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Применяются в основном две группы методов получения количественной информации о случайных процессах нагружения: методы непосредственной схематизации записей процессов и методы, основанные на теории случайных функций (глава 8). Под методом схематизации понимают совокупность правил и допущений, на основе которых реальный процесс нагружения заменяют схематизированным процессом с сохранением выбранных параметров циклов, определяющих усталостное повреждение, предполагая, что схематизированный процесс эквивалентен исходному по величине повреждения. Общим для всех методов является выделение на кривой процесса одного или нескольких параметров и представление их в виде рядов распределения.

Известные методы классифицированы с учетом трех обязательных этапов: 1) выбор параметра исходного процесса, определяющего амплитуды циклов; 2) выбор экстремумов, используемых для построения схематизированного процесса; 3) учет средних напряжений циклов. Рассмотрены особенности известных методов схематизации, в частности, метода укрупненных размахов, предложенного автором и получившего распространение в отечественном машиностроении. Существо этого метода заключается в выборе такого сочетания основных и промежуточных циклов, при котором повреждающее действие оказывается наибольшим.

Для удобства использования метода построены номограммы.

Для сравнения интенсивности повреждающего действия распределений амплитуд напряжений, полученных при схематизации одних и тех же исходных процессов различными методами, большое число типичных осциллограмм было статистически обработано^{х)}. В результате сформулированы следующие выводы:

а) При схематизации методом экстремумов и методом максимумов могут быть получены существенно отличающиеся величины накопленного повреждения, поскольку распределения максимумов и минимумов часто несимметричны относительно среднего уровня.

б) По величине накопленного повреждения методы схематизации можно расположить в порядке убывания следующим образом: 1) максимумов или экстремумов; 2) учета одного экстремума между двумя пересечениями среднего уровня; 3) полных циклов; 4) укрупненных размахов; 5) размахов с учетом средних напряжений полуциклов; 6) размахов.

в) Величины накопленного повреждения при методе укрупненных размахов (D_4) в подавляющем большинстве случаев превышают величины накопленного повреждения при методе размахов с учетом средних напряжений полуциклов (D_5); во всех случаях $D_4 : D_5 > 0,8$; в предельном случае $D_4 : D_5 = \infty$.

г) Метод полных циклов имеет определенные преимущества (меньшая, чем при других методах, чувствительность к неучитываемым размахам; объективная информация об амплитудах всех основных и всех промежуточных циклов). Расчетные величины долговечности, получаемые при методах полных циклов и укрупненных размахов, отличаются в среднем на 20%.

С учетом работ С.В.Серенсена, Р.С.Кинашвили, Б.Н.Дучинского, А.Д.Сергиевского, Н.И.Григорьева, В.И.Труфякова, М.М.Гохберга, Б.А.Морозова, П.М.Волкова и др. разработан графо-аналитический метод учета случайной асимметрии циклов напряжений, основанный на использовании свойств поля взаимокоррелированных максимумов и минимумов процесса, а также на ряде допущений о диаграмме предельных амплитуд. Достигнуто существенное уменьшение трудоемкости расчетов долговечности.

Методы статистического анализа нагруженности при двухосном случайном напряженном состоянии разработаны еще недостаточно. Известные исследования в этой области относятся в основном к случаям синхронного и синфазного изменения напряжений изгиба и кручения.

х) - совместно с В.М.Стариковым и И.М.Илиничем

При анализе осциллограмм напряжений, зарегистрированных прямоугольными розетками датчиков в ряде элементов рам с замкнутыми профилями сечений, отмечено: а) напряжения, регистрируемые поперечным датчиком розетки, незначительны; б) экстремальные напряжения, регистрируемые датчиками, наклеенными вдоль лонжерона и под углом 45° , как правило, синхронны; в) в большинстве опытов знаки экстремальных главных напряжений одинаковы; г) направление главных напряжений колеблется в относительно небольших пределах. Поэтому для таких элементов принято: изменение компонентов напряжений является синхронным и синфазным с постоянным направлением главных напряжений одного знака; применима гипотеза наибольших главных напряжений. Используются линейные корреляционные уравнения связи между показаниями одного из датчиков розетки и главным напряжением типа

$$\sigma_{\text{жв.}} = \sigma_1 = a + b\sigma_2,$$

позволяющие существенно снизить трудоемкость статистической обработки осциллограмм. Методика учета двухосного напряженного состояния, основанная на аппарате теории корреляции, применена при решении ряда прикладных задач: при ориентировочном прогнозе долговечности элементов рам, при выборе режимов стеновых и полигонных ресурсных испытаний несущих систем мобильных машин.

Ручная статистическая обработка осциллограмм очень трудоемка, в связи с чем существует большое число автоматических и полуавтоматических приборов. Рассмотрены особенности применяемых приборов, в том числе созданного совместно с Э.Я.Филатовым, В.Н.Никулиным, В.М.Стариковым, М.Н.Седякиным, В.В.Ереминым прибора, позволяющего обрабатывать осциллограммы при схематизации процессов всеми известными методами (кроме метода полных циклов). Результаты обработки представляются в форме таблиц попарно коррелированных смежных экстремумов кривой процесса. Создан также прибор для обработки записей методом полных циклов.

ГЛАВА 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЖЕННОСТИ

Результаты экспериментов представлены в виде сводных таблиц характеристик распределений, а также в виде эмпирических распределений и графиков полигонов частот и накопленных частот параметров нагружения.

Для большого числа объектов, отличающихся конструкциями и параметрами подвесок ходовых систем, отмечено существенное увеличение напряженности элементов несущих систем с ростом скорости дви-

жения. Например, при движении гусеничного трактора ДТ-75 (с двигателем 150 л.с.) с плугом по грунтовой дороге повышение скорости с 10 до 17 км/час приводит к увеличению среднего значения расщепления амплитуд напряжений на 30%, основного отклонения на 60%, объема ряда на 25%; увеличение скорости поворота этого трактора на стерне с 6,7 до 11,8 км/час повышает амплитуды напряжений в среднем на 20%.

Для колесного самоходного шасси СШ-75 в таблице I приведены определенные методом наименьших квадратов уравнения кривых зависимости максимальных и средних значений амплитуд напряжений от скорости движения V . Каждому участку несущей системы и каждому типу дороги соответствует свое уравнение.

Таблица I

Место наклейки датчиков	Тип дороги	Уравнение кривой
Лонжерон подрамника кузова в зоне соединения со средней поперечиной	Бульжная среднего качества	$\sigma_{max} = 460 + 1,6V + 0,3V^2$
	То же	$\sigma_{cp} = 210 + 0,9V + 0,3V^2$
	Разбитая грунтовая	$\sigma_{max} = 250 + 25V + 0,2V^2$
	Поле с поперечными бороздами	$\sigma_{cp} = 320 + 2V + V^2$
Лонжерон подмоторной рамы в зоне соединения с опорой	Разбитая грунтовая	$\sigma_{max} = 490 + 10V + 0,1V^2$
	То же	$\sigma_{cp} = 310 + 4V + 0,2V^2$
	Бульжная среднего качества	$\sigma_{cp} = 150 + V + 0,1V^2$
	Поле с поперечными бороздами	$\sigma_{cp} = 230 + 30V + 1,1V^2$

Аналогичное закономерное увеличение напряженности с ростом скорости движения получено для несущих систем тракторов Т-150, Т-4, К-700, МТЗ-50, автомобилей ЗИЛ-164А, ЗИЛ-130, прицепов ОдаЗ-885, 2ПТС-4М, 887А, 1ПТС-9 и др.

Тензометрические исследования позволяют в первом приближении оценить правильность выбора формы, размеров и типа крепления дета-

лей несущих систем. Например, для рам тракторных прицепов ЗПТС-4М, изготовленных из лонжеронов и поперечин открытого профиля (поперечина приварена к стенке лонжерона), при замыкании сечений поперечин пластиной, плавно выходящей к стенке профиля, средние значения амплитуд напряжений в опасной зоне уменьшились примерно в 2 раза. Это объясняется резким уменьшением величин бимоментов стесненного кручения в узлах при замене открытого профиля закрытым. Близкие данные получены для других рам при введении в узлы объемных элементов.

В результате исследования вертикальных и горизонтальных (продольных и боковых) нагрузок на опорных цапфах гусеничных тракторов класса 3 т отмечено:

- при повышении скорости транспортного движения тракторов на различных дорогах с 10 до 17 км/час максимальные значения вертикальных нагрузок возрастают в 1,2-2 раза, достигая 8000 кг, причем величины основного отклонения увеличиваются почти пропорционально росту скорости;

- величины боковых нагрузок при крутых поворотах на передних и задних цапфах не равны между собой и с повышением скорости увеличиваются непропорционально;

- максимальные значения горизонтальных продольных нагрузок при движении трактора с навесным плугом по полю с поперечными бороздами со скоростью 10 км/час достигают 5500 кг и увеличиваются на 45% с ростом скорости до 17 км/час;

- между отдельными нагрузками, а также между нагрузками и напряжениями в элементах рам имеется тесная корреляционная связь; с повышением скорости теснота связи возрастает.

Аналогичные данные о закономерностях изменения нагрузок получены для тракторов Т-4, Т-4М, МТЗ-50, прицепов ОДАЗ-885, ИПТС-9, ЗПТС-12, самоходного шасси СШ-75.

Величины динамических коэффициентов, вычисленные по различным параметрам нагружения, значительно отличаются друг от друга. Например, по результатам совместных с В.Я.Тетерятниковым экспериментов на тракторах Т-4 и Т-4М величины динамических коэффициентов (с вероятностью, соответствующей трем основным отклонениям), определенные по напряжениям в лонжероне рамы и ускорению лонжерона, отличаются на различных режимах в 1,8-2,4 раза. При расчетах деталей на статическую прочность рекомендуется учитывать эти отличия. В зависимости от того, расчет какой детали проводится, и следует использовать ту или иную величину коэффициента. Так, при расчете рессоры целесообразно принимать величину, определенную по ее прогибу;

при расчете рам можно использовать коэффициенты по усилиям на опорах или по напряжениям; при расчете осей и подшипников - по усилиям и т.д.

При решении ряда задач представляют интерес данные о величинах коэффициентов вариации $\mathcal{V}$ распределений амплитуд напряжений. В результате схематизации более 1000 осциллограмм отмечено:

а) средние значения рядов амплитуд напряжений и величины $\mathcal{V}$ (при всех методах схематизации) можно считать практически независимыми; б) наиболее широкий диапазон распределения величин $\mathcal{V}$ при методе максимумов 0,2-1,7; $\mathcal{V}_{cp} = 0,64$; при усечении распределения амплитуд ниже 0,5 σ_{1k} диапазон величин $\mathcal{V}$ сужается до 0,1-0,7, $\mathcal{V}_{cp} = 0,33$; в) при методе укрупненных размахов диапазон изменения $\mathcal{V}$ невелик: 0,1-0,5; $\mathcal{V}_{cp} = 0,24$; усечение распределения амплитуд практически не изменяет диапазона ($\mathcal{V}_{cp} = 0,20$), поскольку на стадии разметки записей отбрасывается значительное число малых амплитуд; г) при методе полных циклов диапазон $\mathcal{V}$ равен 0,5-0,9; $\mathcal{V}_{cp} = 0,69$; при усечении диапазон равен 0,1-0,6; $\mathcal{V}_{cp} = 0,33$; следовательно, усечение выборок при этом методе приближает их к выборкам, получаемым при методе укрупненных размахов.

ГЛАВА 7. ПРОГНОЗ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАПРЯЖЕННОСТИ

При линейном суммировании формула накопленного повреждения имеет вид:

$$D = \frac{N}{N_0 \sigma_{1k}^m} \int_{\sigma_{min}}^{\sigma_{max}} \sigma^m \Phi'(\sigma) d\sigma, \quad (I)$$

где N - число циклов напряжений при данном режиме нагружения; N_0, σ_{1k}, m - константы степенного уравнения кривой усталости; $\Phi'(\sigma)$ - функция плотности распределения амплитуд напряжений. Вычисление интеграла в этой формуле связано с рядом трудностей. Поскольку эмпирические распределения амплитуд, полученные методом укрупненных размахов, удовлетворительно описываются логарифмически нормальным законом, разработан алгоритм определения интеграла для таких распределений, удобный для расчетов на ЭВМ и вручную (с использованием таблицы интеграла вероятностей).

На примерах эксплуатационных распределений амплитуд напряжений произведена оценка относительных погрешностей вычисления величины D по формуле (I) в зависимости от верхних границ суммирования (нижний предел суммирования принимался равным $0,9 \sigma_{1k}$).

Для логарифмически нормальных распределений расхождение расчетных величин $\mathcal{D}$ при пределах $3S$ и ∞ не превышает 3,5%. При использовании эмпирических распределений амплитуд напряжений и верхнем пределе, равном σ_{max} , величины $\mathcal{D}$ отличаются не более чем на 8% от величин, полученных при логарифмически нормальном распределении и верхнем пределе ∞ . Рекомендовано при расчетах долговечности ограничивать верхний предел суммирования величиной σ_{max} — наибольшей наблюдаемой амплитудой эмпирического распределения (в случае использования представительных выборок, у которых $\sigma_{max} \approx 3S$).

На основании расчетов по формуле (I) отмечено, что для распределений, у которых среднее значение амплитуды $\sigma_{cp} > \sigma_{-1k}$, изменение нижней границы суммирования незначительно (в пределах 15%) влияет на результаты вычислений; в случае $\sigma_{cp} \leq \sigma_{-1k}$ изменение величины σ_{min} существенно отражается на расчетной величине $\mathcal{D}$.

Задача определения накопленного повреждения, следовательно, и долговечности; по существу является статистической задачей. Основа расчета — определение в формуле (I) величины интеграла, которая является частью m -го момента распределения амплитуд напряжений на интервале от σ_{min} до σ_{max} . Поскольку функция $\varphi(\sigma)$ в выражении (I) известна, как правило, приближенно, применение в расчетах долговечности эмпирических распределений связано с погрешностями, обусловленными кратковременностью регистрации процессов нагружения деталей (по сравнению с их ресурсом), вероятностной природой изменения нагрузок, схематизацией процессов нагружения и т.п. Эти погрешности не устраняются при замене эмпирических распределений теоретическими.

Кроме того, при подборе теоретического распределения к имеющемуся эмпирическому распределению учитываются отклонения частот по всем разрядам, в то время как для расчета используется лишь часть распределения на участке от $\sigma > \sigma_{min}$. Для того, чтобы показать, что наиболее принятое и удовлетворительно согласующееся с опытными данными логарифмически нормальное распределение часто оказывается далеко не лучшей аппроксимацией суммируемой части эмпирического распределения, рассмотрен класс функций вида:

$$h(x) = x^\alpha e^{\beta x + \gamma} \quad (2)$$

Для большого числа примеров подсчитаны средние квадраты отклонений функций (2) и функций логарифмически нормального закона от эмпирического распределения. По результатам расчетов нельзя отдать предпочтения ни функции (2), ни логарифмически нормальному

распределению, поскольку в половине примеров лучше кривая (2), в части примеров — лучше логарифмически нормальный закон, в небольшом числе примеров они равноценны. Можно сделать вывод о некотором субъективизме при аппроксимации эмпирических кривых непрерывными распределениями. К тому же должно быть учтено, что вариации в выборе параметров кривых усталости, а также в выборе метода схематизации процесса нагружения приводят к изменению величин D на порядки, в то время как эти же величины, полученные с использованием теоретического и эмпирического распределений (по данным наших расчетов при фиксированных значениях $\sigma_{\text{изл}}, m, N$), различаются менее чем на 10%. Таким образом, использование теоретических распределений увеличивает трудоемкость и не повышает точность расчетов долговечности по сравнению с использованием эмпирических распределений амплитуд напряжений. Целесообразно применять алгоритмы, независимые от гипотез о типе распределения.

На основе линейного суммирования повреждений и схематизации процессов изменения напряжений методом укрупненных размахов выполнены расчеты средней долговечности элементов несущих систем для стадии окончательного разрушения как с учетом амплитуд напряжений ниже исходного предела усталости, так и без учета этих амплитуд. Параметры кривых усталости принимались по данным экспериментов Г.А.Николаева, М.М.Гохберга, А.Е.Асниса, В.И.Труфякова, Б.А.Морозова, К.П.Большакова, М.М.Михеева и др. Расчетные величины были и выше и ниже экспериментальных (диапазон их отношения равен 0,2–12,0), полученных в результате полигонных и эксплуатационных испытаний. Одной из основных причин такого большого расхождения является сложный характер развития трещин в рамах. Таким образом, расчет долговечности для стадии разрушения сложных статически неопределимых систем по результатам тензометрирования весьма неточен и может приводить к большим ошибкам.

Выполнены также расчеты средней долговечности для стадии появления макротрещин длиной около 10 мм. Напряжения ниже 0,9 $\sigma_{\text{изл}}$ не учитывались. Для 39 примеров расчетные величины сопоставлены со средними экспериментальными значениями, полученными по результатам эксплуатации и полигонных испытаний 376 натурных образцов несущих систем 18 марок машин. Распределение величин предельного накопленного повреждения $a = n_{\text{слит}} : n_{\text{расч}}$ удовлетворительно описывается логарифмически нормальным законом; $a_{\text{ср}} = 1,12$; $a_{\text{средн.в.к.}} = 1,08$, т.е. ошибка расчетов в среднем идет в запас долговечности. Вероятность ошибки более чем в 2 раза составляет 0,1.

На основе выполненных расчетов и экспериментов для прогноза

M132206

средней долговечности (по критерию появления трещин) элементов металлоконструкций тракторов и других машин рекомендована методика расчета, основанная на следующих гипотезах и допущениях: 1) накопление усталостных повреждений происходит линейно, причем сумма относительных долговечностей равна единице; 2) схематизация процессов изменения напряжений методами укрупненных размахов и полных циклов наиболее полно отражает особенности случайного нагружения; 3) усталостное повреждение (для стадии зарождения макротрещин) создается преимущественно амплитудами напряжений, превышающими пределы выносливости; 4) верхний предел суммирования можно ограничивать максимальными амплитудами эмпирических распределений напряжений; 5) при отсутствии кривой усталости детали можно использовать осредненные параметры кривых усталости, полученные в результате испытаний элементов металлоконструкций с типичными видами концентрации напряжений.

ГЛАВА 8. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ СЛУЧАЙНЫХ ФУНКЦИЙ И СТАТИСТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ ПРОГНОЗА ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Теоретические основы случайных процессов, разработанные А.Н.Колмогоровым, А.Я.Хинчиным и Н.Винером, нашли широкое применение в работах В.С.Пугачева, В.В.Солодниковой, И.Е.Казакова и др. по автоматическому регулированию, в работах Б.Р.Левина, А.А.Харкевича, С.Райса, Дж.Бендата, Д.Миддлтона и др. по статистической радиотехнике и электронике, в работах А.А.Свешникова, В.В.Болотина, М.Ф.Диментберга, Н.А.Николаенко, А.А.Первозванского, В.В.Екимова, А.А.Силаева, С.Кренделла, Дж.Майлса и др. по случайным колебаниям механических систем. Методы теории случайных функций и статистической динамики находят все более широкое применение в задачах усталостной прочности при определении вероятностных характеристик случайных процессов. В этих задачах по сравнению с методами непосредственной схематизации записей (глава 5) методы теории случайных функций пока более трудоемки, но открывают принципиальную возможность получать количественную информацию о распределениях всех необходимых параметров процесса нагружения по известным статистическим свойствам входных процессов (например, микропрофилей полей и дорог) и динамическим свойствам изучаемых объектов.

Практическое использование методов теории случайных функций для расчета долговечности связано с рядом нерешенных проблем, таких как устранение вычислительных трудностей при определении необходимых параметров процесса нагружения, оценка точности результа-

тов расчета, ограничение области применимости различных моделей для исходных процессов и др. Так, из необходимых для расчета распределений максимумов, размахов, укрупненных размахов и т.п. в настоящее время практически можно воспользоваться только распределением максимумов для гауссовских стационарных (или квазистационарных) процессов. Между тем в последние годы методы теории случайных функций применяются в расчетах долговечности без проверки соответствия свойств реальных процессов свойствам модели гауссовского стационарного процесса и без сопоставления получаемых при этом результатов с результатами расчетов, основанных на использовании методов непосредственной схематизации.

Были поставлены задачи^{х)}: сравнить результаты расчета долговечности при использовании двух упомянутых методов получения распределений максимумов напряжений; рассмотреть особенности применения методов теории случайных функций в расчетах долговечности деталей, для которых в качестве модели процессов нагружения можно выбрать гауссовские случайные стационарные процессы (используя общепринятые приближенные критерии).

Общепринятым является заимствованное из радиотехники подразделение процессов на узкополосные и широкополосные: у узкополосного процесса энергетический спектр сосредоточен в относительно узкой полосе частот Δ около средней частоты ω_0 , причем $\omega_0 \gg \Delta$ (где $\Delta = \omega_b - \omega_n$; ω_b - высшая, ω_n - низшая частоты спектра); у широкополосного процесса энергетический спектр распространен до высоких частот, причем $\omega_0 \approx 0,5 \Delta$. Таким образом, в качестве одной из характеристик процессов принимается отношение $\xi = 0,5\Delta : \omega_0$. Для узкополосных процессов $\xi \rightarrow 0$, для широкополосных $\xi \rightarrow 1$. Полученные нами спектры изменения напряжений в элементах рам не могут быть отнесены ни к узкополосным, ни к широкополосным, поскольку они сосредоточены в полосе относительно низких частот, причем $\xi = 0,37 \div 0,95$.

Второй общепринятой характеристикой случайных процессов, дающей представление о их структуре, является отношение среднего числа нулей (пересечений среднего уровня) к среднему числу экстремумов $\beta = \bar{n}_0 : \bar{n}_2$. Для рассматриваемых процессов $\beta = 0,37 \div 0,90$.

Показано, что при расчетах долговечности, кроме двух параметров (ξ и β), для полной характеристики структуры случайных процессов необходимо сравнивать распределения максимумов, минимумов и размахов; процессы целесообразно разбить на три группы:

х) - эти задачи решались при участии А.С.Гусева и И.М.Илинича

1) узкополосные процессы ($\epsilon \rightarrow 0$; $\beta \approx 1$); 2) широкополосные процессы с малым отличием распределений расчетных амплитуд напряжений ($\epsilon > 0$; $\beta \rightarrow 1$); 3) широкополосные процессы с большим отличием распределений расчетных амплитуд напряжений ($\epsilon > 0$; $\beta < 1$). Для первых двух групп рекомендована схематизация по максимумам (как наиболее простая); для третьей группы – схематизация по укрупненным размахам или по полным циклам.

В расчетах долговечности на основе линейной гипотезы при использовании распределений амплитуд напряжений, полученных непосредственной схематизацией записи процесса, применена известная формула М.Майнера–Д.Н.Решетова. При использовании методов теории случайных функций расчеты долговечности T производились по формуле Дж.Майлса–В.В.Болотина:

$$T = \frac{T_e N_0 \sigma_{-1k}}{S_\sigma^m P(\alpha_0^2; m+2) \Psi(m+2)}, \quad (3)$$

где S_σ – основное отклонение процесса нагружения; $P(\alpha_0^2; m+2)$ – табулированная функция хи-квадрат распределения; $\alpha_0 = \sigma_{\min} / S_\sigma$; $\Psi(m+2)$ – нормировочная постоянная в распределении хи-квадрат; $T_e = 2\pi / \omega_0$ – средний ("эффективный") период процесса; $\omega_0 = S_\sigma / S_{\dot{\sigma}}$ – средняя круговая частота; $S_{\dot{\sigma}}$ – основное отклонение первой производной процесса. Значения S_σ и $S_{\dot{\sigma}}$ могут быть вычислены либо по корреляционной функции процесса $R(\tau)$, либо по его спектральной плотности $\Phi(\omega)$:

$$S_\sigma^2 = R(0) = \int_0^\infty \Phi(\omega) d\omega, \quad (4)$$

$$S_{\dot{\sigma}}^2 = -\ddot{R}(0) = \int_0^\infty \omega^2 \Phi(\omega) d\omega. \quad (5)$$

При использовании для этой цели корреляционных функций следует иметь в виду, что часто эмпирические корреляционные функции, получаемые на практике, хорошо аппроксимируются аналитическими выражениями, для которых не существует второй производной. В таких случаях, не проводя аппроксимации, А.С.Гусев и А.П.Мельчаков использовали численные методы дифференцирования в конечных разностях. Однако этот метод дает результат, сильно зависящий от Δt – шага квантования процесса. Для рассмотренных примеров оказалось, что с изменением шага от 0,05 до 0,15 сек. величины T_e увеличи-

лись в 1,3-3,4 раза.

Чтобы исключить непосредственное влияние шага квантования на результаты вычислений, величины $\mathcal{J}_\varepsilon$ определялись по энергетическому спектру, получаемому по формуле Хинчина-Винера численным интегрированием на ЭВМ эмпирической корреляционной функции:

$$\Phi(\omega) = \frac{2}{\pi} \sum_{i=0}^N R_i \cos(\omega_i \Delta t) \Delta t, \quad (6)$$

R_i - дискретные значения эмпирической корреляционной функции для моментов времени $i\Delta t$ ($i = 1, 2, 3, \dots$); $N = T/\Delta t$; T - длительность реализации процесса; ω - круговая частота в интервале от 0 до $\pi/\Delta t$ (наибольшее значение ω выбиралось, таким образом, на основании известной теоремы В.А.Котельникова),

Полученные кривые энергетических спектров сглаживались методом осреднения по рекомендациям работы В.С.Пугачева. Интегралы в выражениях (4) и (5) определялись численными методами по формулам типа Ньютона-Котеса. В связи с необходимостью сглаживания энергетических спектров проводилась дополнительная проверка точности принятых вычислительных методов. Во-первых, сравнивались результаты вычисления T_ε тремя методами: а) численным дифференцированием; б) численным интегрированием, в) непосредственным подсчетом на записи процесса. При вычислениях методами "а" и "б" наибольшее расхождение результатов составляет соответственно 65% и 26% от значений, определенных методом "в"; следовательно, применение в расчетах долговечности численного интегрирования позволяет получить более точные результаты, чем применение численного дифференцирования. Во-вторых, сравнивались величины средних чисел нулей $\bar{n}_0$ и экстремумов $\bar{n}_\varepsilon$, подсчитанных непосредственно на записи процесса, с величинами $\bar{n}_0$ и $\bar{n}_\varepsilon$, определенными по формулам С.Райса. Соотношения сравниваемых величин лежат в диапазоне $0,9 \pm 1,46$. Кроме того, сопоставлены определенные по записи процесса и расчетные величины характеристик β ; отношения их лежат в диапазоне $0,68 \pm 1,04$. Таким образом, принятый метод вычислений можно рекомендовать для приближенного определения числа действующих циклов.

Отношения величин долговечности, подсчитанных при использовании распределений максимумов, полученных непосредственной схематизацией записей и методами теории случайных функций, находятся в диапазоне $0,36 \pm 1,90$. Расхождения сравниваемых величин (выявленные на примерах процессов нагружения с раз-

личным структурным и частотным составом) могут быть объяснены отклонением реальных процессов от принятой модели и недостаточной разработкой математических методов для получения границ точности статистических выводов в теории случайных функций. Следовательно, формулу (3) рекомендуется применять с осторожностью, если строго не доказано соответствие свойств процессов нагружения свойствам гауссовского стационарного процесса.

Вычисление долговечности при широкополосных случайных процессах связано со значительными трудностями, обусловленными наличием на записях процессов сложных циклов. Рассмотрены работы В.В.Болотина, М.Ф.Диментберга, Г.А.Андреева, И.Д.Гиц, В.Л.Райхера, Дж.Райса, Ф.Бира. Подтвержден вывод М.Ф.Диментберга о применимости формулы (3), выведенной для узкополосных стационарных нормальных процессов, в расчетах долговечности при широких спектрах частот. В рассмотренных нами примерах ($\beta = 0,37-0,90$) величины долговечности, подсчитанные по формуле (3) и по формуле М.Ф.Диментберга (с использованием распределения С.Райса для максимумов широкополосного нормального процесса), отличались не более, чем на 10%. Вычислены на ЭВМ параметры распределения С.Райса; в частности, получено, что коэффициенты вариации этого распределения изменяются в диапазоне $1,6 \pm 0,52$ при $0,33 \leq \beta \leq 1$.

Вместе с тем использование для широкополосных процессов расчетных зависимостей Дж.Майлса, В.В.Болотина, М.Ф.Диментберга, В.Л.Райхера приводит к занижению величин долговечности, а зависимостей Г.А.Андреева, И.Д.Гиц, Дж.Райса, Ф.Бира - к завышению величин долговечности по сравнению с величинами, получаемыми при схематизации процессов методами укрупненных размахов и полных циклов (в главе 7 показано, что при этих методах расчетные величины на более близко соответствуют экспериментальным значениям).

Рассмотрены методические вопросы измерения и статистического описания микропрофилей пути, как входных процессов для системы "профиль пути-мобильная машина-напряжения в элементах рамы" с учетом работ Р.В.Ротенберга, И.Г.Пархиловского, Я.М.Певзнера, А.А.Тихонова, А.А.Силаева, В.Б.Проскурякова, Н.Н.Яценко, О.К.Прутчикова, А.А.Хачатурова, В.Я.Аниловича, П.Кесслера, Дж.Хоуболта, М.Митшке и др. Поскольку направление движения машин, величина, форма, расположение и упругие свойства неровностей являются случайными функциями времени и могут сочетаться в самых различных вариантах, неизбежны упрощения при количественных характеристиках дорог. Одним из основных допущений является возможность замены всех встречаю-

щихся вариантов определенным числом типичных видов пути с фиксированными статистическими свойствами.

Получены характеристики микропрофилей 8 типов дорог и полей при измерении от постоянных неподвижных и подвижных линий отсчета. В частности, на укатанных и разбитых грунтовых дорогах около 70% впадин имеет симметричный синусоидальный или трапециевидный профиль, основные отклонения микропрофилей левой и правой колеи отличаются незначительно (не более чем на 6%), количество неровностей по обеим колеям примерно одинаково, нормированные корреляционные функции для них почти совпали. Совместно с А.И.Шевченко изучена зависимость высот от длин неровностей; выяснено, что с ростом длин неровностей их высоты увеличиваются. С возрастанием высот неровностей одной колеи сопряженные высоты другой колеи тоже увеличиваются, причем величины коэффициентов корреляции находятся в диапазоне 0,8–0,93.

Воздействие микропрофилей пути на нагруженность рамы мобильной машины предложено оценивать с учетом трех статистических характеристик: а) корреляционной функции продольного микропрофиля; б) корреляционной функции поперечного микропрофиля (изменения высоты высот неровностей по двум колеям во времени); в) взаимокорреляционной функции продольного и поперечного микропрофилей.

Применительно к прогнозам долговечности элементов сложных статически неопределимых систем типа рам еще не завершены поиски оптимальной схемы использования методов статистической динамики, в частности недостаточно разработаны вопросы точности получаемых результатов. Этот вывод сделан на основе рассмотрения работ К.М.Атояна, Р.А.Акопяна, В.Б.Проскурякова, Н.Н.Яценко. Отмечено также, что приемлемая по трудоемкости и точности методика учета суммарного воздействия вертикального и горизонтального изгиба и кручения рам еще не разработана. Высказано предположение, что модули передаточных функций колебательной системы, получаемые в результате соотношения энергетических спектров процессов изменения напряжений в элементах рам и процессов изменения продольного и поперечного микропрофилей пути, будут существенно изменяться при изменении условий движения (скорости и типа дороги).

ГЛАВА 9. УСКОРЕННЫЕ ПОЛИГОНЫ И СТЕПЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ РЕСУРСА НЕСУЩИХ СИСТЕМ

Ускоренными ресурсными испытаниями называются испытания, позволяющие определить ресурс элементов конструкций быстрее, чем при

их эксплуатации. К ним относятся: 1) стендовые испытания; 2) полигонные испытания (на специальных треках или трассах); 3) эксплуатационные испытания в тяжелых условиях и с повышенным использованием календарного времени (по сравнению с действительной эксплуатацией). Ускоренные ресурсные испытания применяются в машиностроении в течение нескольких десятилетий. Накопленный опыт обобщен Р.В.Кугелем в 1954 г. в виде сформулированных им основных положений. Ресурсные полигонные испытания несущих систем мобильных машин в СССР в большом объеме впервые проведены под руководством автора на треках полигонов НАТИ. Методические основы ускоренных ресурсных испытаний, дополненные и развитые автором совместно с Р.В.Кугелем с учетом полученного опыта, опубликованы в ряде работ и нашли отражение в руководящих технических материалах тракторостроения СССР и Постоянной комиссии машиностроения СЭВ.

На полигонах можно определить ресурс элементов машин в сборе и проверить взаимное влияние узлов на долговечность. В этом смысле полигонные испытания имеют преимущества по сравнению со стендовыми. В свою очередь стендовые испытания позволяют уменьшить стоимость и длительность доводки отдельных элементов машин по сравнению с испытаниями на полигонах. В общем процессе обеспечения требуемого ресурса конструкций стендовые, полигонные и эксплуатационные испытания дополняют друг друга.

Методам и оборудованию стендовых испытаний элементов металлоконструкций посвящены работы С.В.Серенсена, М.Э.Гарфа, В.А.Кузьменко, Э.Я.Филатова, В.И.Труфякова, М.М.Гохберга, А.М.Пенькова, М.М.Кобрина и др. С учетом опыта этих работ в НАТИ создан комплекс оборудования^{х)}, включающий гидропульсаторы, стенды с выносными гидропульсационными цилиндрами и инерционными механическими вибраторами направленного действия, различные испытательные машины. Проведены испытания на усталость нескольких вариантов осей колес прицепов, сварных балок замкнутого сечения с концентратором в виде прямоугольной пластины (приваренной посередине балки непрерывным сварным швом) из сталей Ст.Зсп и 10Г2Б при изгибе, плоских образцов с двухсторонним стыковым швом посередине из сталей Ст.Зсп и 09Г2 при растяжении-сжатии и изгибе, рам тракторов ДТ-75М и рам тележек гусениц тракторов Т-4 при кручении с изгибом, литых поперечных брусьев рам при изгибе. Для проведения испытаний решены ос-

х) - В создании оборудования и проведении испытаний участвовали инженеры А.П.Давыдов, Х.И.Хазанов, Ю.С.Борисов, А.И.Демидов, З.А.Батуров.

новные методические вопросы, такие как: выбор схем крепления и нагружения объектов испытаний; контроль стадий разрушения; обоснование предельного состояния объектов при выборе длительности испытаний и др. Результаты испытаний способствовали совершенствованию конструкций и повышению долговечности несущих систем.

Для оценки влияния типа программы и напряжений ниже исходного предела выносливости совместно с Э.Я.Филатовым, В.Н.Белокуровым и Ю.С.Борисовым исследовано сопротивление усталости плоских сварных образцов из стали 09Г2 с двухсторонним стыковым швом при программном симметричном нагружении (консольный изгиб), моделирующем типичные распределения эксплуатационных напряжений (коэффициент вариации $\mathcal{V} = 0,24$; распределения получены схематизацией процессов методом укрупненных размахов).

Весь диапазон амплитуд программируемого распределения разбивался на 6 равных ступеней и по параметрам логарифмически нормального распределения вычислялись числа циклов нагружения на каждой ступени с учетом возможностей программирующего устройства и условия разрушения образца не ранее, чем после 15-20 блоков нагружения. Программа А включала в себя 6 ступеней, из них 2 ниже исходного предела выносливости; программа В состояла из 4-х верхних ступеней программы А; программа С получена из программы В путем увеличения в 1,2 раза всех амплитуд. Предварительно были получены кривые усталости (испытано 45 образцов). Кривая по моменту образования трещины длиной около 3 мм почти параллельна кривой по разрушению образцов. Долговечность по трещинообразованию составляет в среднем 30% долговечности до разрушения.

В таблице 2 даны средние значения долговечности, выраженные в числах блоков программного нагружения: n_0 - опытная долговечность по трещинообразованию, n'_0 - то же по разрушению, n_p - расчетная долговечность по трещинообразованию при линейном суммировании, n'_p - то же по разрушению; кроме того, приведены величины сумм накопленных повреждений $a = n_c : n_p$.

Таблица 2

Программа	Число образцов	n_c	n_p	a	n'_0	n'_p	a'
А	21	62,9	65,2 (39,7)	0,96 (1,58)	90,6	124,4 (78,5)	0,73 (1,15)
В	5	93,8	65,2	1,44	150,4	124,4	1,21
С	15	27,2	28,0	0,97	55,0	50,9	1,08

Средневзвешенное $a = 1,02$; средневзвешенное $a' = 0,92$.

Примечание. В скобках указаны значения долговечности, подсчитанные с учетом всех ступеней программы А.

В результате испытаний сделаны следующие выводы:

1. При программном симметричном нагружении сварных образцов накопление повреждений следует линейному закону суммирования; с достаточной для инженерных задач точностью предельное накопленное повреждение может быть принято равным единице.

2. Распределения амплитуд напряжений (при схематизации методом укрупненных размахов) имеют малый диапазон изменения коэффициента вариации, в связи с чем их можно рассматривать как подобные, что существенно облегчает составление программ испытаний.

3. Распределения долговечности образцов при постоянных и программных амплитудах напряжений удовлетворительно согласуются с логарифмически нормальным законом. С повышением уровня напряжений рассеивание долговечности уменьшается.

Для выбора режимов ресурсных полигонных испытаний определялись для различных зон страны приведенные распределения амплитуд напряжений с учетом длительности отдельных типичных эксплуатационных режимов нагружения. Приведенное распределение для наиболее "опасной" по повреждающему действию зоны страны принималось для выбора режима ускоренных испытаний. Если был заранее известен вариант наиболее тяжелых условий эксплуатации, то приведенное распределение определялось только для этого варианта. Дальнейшим практически приемлемым упрощением является использование для выбора режимов испытаний распределений напряжений тех типичных эксплуатационных режимов, которые характеризуются наибольшим повреждающим действием.

Выбранные таким методом эксплуатационные распределения напряжений сопоставлялись с распределениями, полученными при различных условиях движения по трекам полигонов. Поскольку не всегда возможен подбор режима испытаний, при котором для всех точек сложной конструкции совпали бы сравниваемые распределения, для основных элементов конструкции обеспечивалось совпадение максимальных амплитуд напряжений при ускоренных испытаниях и при выбранных условиях эксплуатации со смещением ряда выбираемого режима испытаний в сторону больших амплитуд. Это достигалось изменением скорости движения машин на треках, нагрузки в кузове, высоты, расположения и формы препятствий на треках и т.д.

Несмотря на широкое распространение и высокую эффективность ресурсных испытаний на полигонах, до настоящего времени отсутствуют единые методики выбора сооружений треков полигонов. На основе изуче-

ния работ о полигонах, в частности, работ С.А.Лаптева, Р.В.Кутеля, Н.Н.Яценко, Дж.Грэхема, Р.Коля, Б.Симпсона, отмечено, что применяют два способа создания профилей неровностей на треках: а) воспроизведение (или в максимально близкой мере, или с учтенным расположением неровностей) профилей выбранных типичных участков дорог, замеренных в эксплуатации; б) расположение в различных вариантах искусственных препятствий различных размеров и форм на треках с твердым покрытием. Применительно к испытаниям несущих систем машин предпочтителен способ "б", при котором обеспечивается меньшая стоимость треков и более высокие коэффициенты ускорения испытаний, чем при способе "а". Проверка пригодности того или иного типа препятствий и режима испытаний, как правило, проводится путем испытания на выбранных препятствиях серийных машин и сравнения результатов испытаний с результатами, полученными при длительной эксплуатации.

На четырех треках полигонов НАТИ применены только четыре вида препятствий (по одному на каждом треке) высотой от 140 до 175 мм с шахматным расположением для воспроизведения основных видов эксплуатационного деформирования рам машин: кручения, вертикального и горизонтального изгиба. Шаг препятствий принят от 3,75 до 6,25 м с учетом продольных баз испытываемых машин.

В качестве критерия оценки долговечности по результатам ускоренных ресурсных испытаний приняты повреждения, обуславливающие наступление предельного состояния несущих систем, которое выражается в невозможности дальнейшей эксплуатации вследствие усталостного разрушения одного или нескольких элементов, потери жесткости (приводящей к повреждениям других агрегатов) и нарушения норм техники безопасности. При полигонных испытаниях, так же как и в эксплуатации рам, отмечены случаи весьма медленного развития усталостных трещин. Одна из основных причин - перераспределение силового потока между смежными элементами. Создание конструкций с медленно растущими трещинами является существенным резервом снижения металлоемкости рам тракторов и других машин. Таким рамам следует отдать предпочтение по сравнению с рамами, быстро разрушающимися после появления трещин.

Для типичных сварных узлов рам обобщены данные о скорости развития трещин и величине коэффициента S , равного отношению наработки узла после появления видимой трещины к наработке при завершении испытаний. Величины S изменяются в диапазоне 0,25-0,75. В связи со сложными закономерностями развития трещин в рамах приближенный расчетный прогноз их среднего ресурса (по критерию предельного состояния) на основании результатов тензометрирования предложено произво-

дить по формуле:

$$R_{\text{ср}} = \frac{T_{\text{ср}}}{1-C}, \quad (7)$$

где $T_{\text{ср}}$ - долговечность по критерию появления трещин, подсчитанная по формуле линейного суммирования повреждений; C - экспериментальная величина коэффициента для данного типа узла.

Прогноз эксплуатационного ресурса является одной из наиболее сложных проблем ускоренных ресурсных испытаний. Разработана методика прогноза гамма-процентного ресурса деталей по результатам ускоренных испытаний, основанная на использовании величин $\hat{R}_{\gamma v} = R_{\gamma v} : R_{\text{ср}}$ - относительного гамма-процентного ресурса (при данном коэффициенте вариации V распределения ресурса). Учтено, что величины $\hat{R}_{\gamma v}$ практически (в пределах 10%) не зависят от типа закона, принятого для аппроксимации распределения эксплуатационного ресурса (при $V \leq 0,7$ и $\gamma = 80\%$). Для прогноза ресурса необходимо располагать величинами коэффициента $K_{n\text{ср}}$ (равного среднему числу нагружений при ускоренных испытаниях, эквивалентному по разрушающему действию единице наработки в эксплуатации) и коэффициента вариации $V_{\text{эксп.}}$, полученными для прототипов испытываемого узла.

Опыт испытаний различных вариантов конструкций позволил сформулировать основные правила рационального конструирования и повышения ресурса сварных узлов несущих систем мобильных машин. Особо эффективно: применение профилей замкнутых очечий; выведение концентраторов напряжений в малонагруженные зоны; применение стыковых соединений; увеличение степени статической неопределимости узлов введением объемных элементов и дополнительных связей (в частности, приваркой в открытых профилях замыкающих пластин с плавным приближением к стенке профиля; при этом концентратор напряжений выводится в зону затухания бимоментов отсеченного кручения); применение замкнутых швов в нахлесточных соединениях. Использование этих правил с учетом результатов комплексной расчетно-экспериментальной системы позволило достигнуть существенного увеличения ресурса рам ряда машин. В результате выполненных совместно с заводами работ за 1963-1970 гг. в серийное производство внедрены 15 моделей усиленных рам тракторов ДТ-54А, Т-74, ДТ-75, ДТ-75М, К-700, Т-4, Т-4А, самоходных массы СШ-75, Т-16М, прицепов ОДАЗ-885, ПКТ-2 и др. В завершающей стадии внедрения находятся 12 новых моделей несущих систем других машин.

ВЫВОДЫ

На протяжении 1958–1970 гг. проведен комплекс исследований, включающий тензометрирование 80 конструкций рам, ускоренные ресурсные испытания 250 образцов несущих систем тракторов (сельскохозяйственных, промышленных и трелевочных), самоходных шасси, автомобилей и прицепов, а также лабораторные испытания на усталость более 300 сварных плоских образцов и балок. Материалы этих исследований в сочетании с данными эксплуатационных наблюдений привели к следующим результатам.

1. Усовершенствована методика экспериментальных исследований нагруженности несущих систем тракторов и других машин, в частности: а) определена оптимальная длина участков регистрации процессов нагружения: для дорог 1000–1500 м, для полей – 500 м; при этом относительные погрешности среднеквадратичных отклонений $\sigma_{\text{ср}}$ распределений амплитуд напряжений не превышает 10% (по сравнению с $\sigma_{\text{ср}}$ при длине участков 5000 м); б) показана правомерность ряда упрощений и методических приемов (размещение датчиков только в наиболее нагруженных местах деталей с зонами высокой концентрации напряжений; начало тензометрических опытов с режимов, которые характеризуются высокой нагруженностью и др.), позволяющих значительно сократить объем работ без существенного снижения полноты информации.

2. Наибольшее повреждающее действие на несущие системы всех видов изученных машин оказывают режимы транспортного движения по грунтовым, булыжным и асфальтовым дорогам плохого качества, а также по полям с поперечными бороздами от пахоты и междурядной обработки. Кроме того, для каждого вида машины существует несколько типичных кратковременных операций, оказывающих значительное повреждающее действие на элементы несущих систем (например, для гусеничных тракторов – крутые повороты и заглубление–выглубление навесного плуга).

3. Показано, что с ростом скорости движения машин распределения амплитуд напряжений и нагрузок (действующих на опоры машин), как правило, смещаются в сторону более высоких значений, причем число повторений амплитуд за один и тот же период существенно возрастает. Зависимости параметров распределений от скорости движения машин (как безрессорных, так и с упругой подвеской) удовлетворительно описываются кривыми второго порядка. Каждому элементу системы и каждому типу дороги соответствует свое уравнение кривой.

4. Установлено, что в большинстве случаев распределения вертикальных, горизонтальных и боковых нагрузок у машин с различными

типами подвесок не противоречат нормальному закону.

5. Методами регрессионного анализа установлено, что между нагрузками, действующими одновременно на разные опоры машин, имеется тесная корреляционная связь; такая же связь имеется между нагрузками и напряжениями в элементах рам. По результатам экспериментов методом наименьших квадратов построены уравнения корреляционной связи, использованные при расчетах статической прочности рам, при разработке методик полигонных и стендовых испытаний.

6. Предложен новый метод укрупненных размахов для схематизации процессов нагружения, получивший распространение в отечественном машиностроении; созданы приборы для обработки бумажных осциллограмм этим и другими методами.

7. Классифицированы методы схематизации записей процессов нагружения деталей. Путем сопоставления расчетных величин долговечности при схематизации одних и тех же процессов различными методами показано, что наиболее известные методы схематизации располагаются в порядке возрастания относительной расчетной долговечности следующим образом: максимумов или экстремумов; учета одного экстремума между двумя пересечениями среднего уровня; полных циклов; укрупненных размахов; размахов с учетом средних напряжений полциклов; размахов.

При использовании метода полных циклов расчетная долговечность в среднем на 20% ниже долговечности, определенной по укрупненным размахам; учитывая близость расчетных величин долговечности с экспериментальными величинами, методы укрупненных размахов и полных циклов рекомендованы для широкого применения.

8. При схематизации большого числа процессов изменения напряжений различными методами получены распределения коэффициентов вариации $\bar{v}$ эмпирических рядов амплитуд напряжений, а также построены поля корреляции величин $\bar{r}$ и $\bar{b}_{\varphi}$; установлено, что эти величины можно считать практически независимыми. Наиболее широкий диапазон распределения $\bar{v}$ при методе максимумов $0,2 \div 1,7$ ($\bar{v}_{\varphi} = 0,64$). При методе укрупненных размахов диапазон изменения $\bar{v}$ невелик: $0,1 \div 0,5$ ($\bar{v}_{\varphi} = 0,24$); это обстоятельство использовано при разработке программ нагружения для усталостных испытаний.

9. Решен ряд методических вопросов прикладных расчетов долговечности при случайном нагружении:

а) Разработан графо-аналитический метод учета случайной асимметрии циклов напряжений, основанный на использовании свойств поля взаимокоррелированных соседних максимумов и минимумов процесса, а

также на ряде допущений о диаграмме предельных амплитуд.

б) Показано, что при вычислениях накопленного повреждения D изменение нижней границы линейного суммирования σ_{min} ниже σ_{cp} не оказывает существенного влияния на результаты расчета; при $\sigma_{min} > \sigma_{cp}$ изменение σ_{min} существенно влияет на величину D .

в) Отмечено, что при описании выборочных распределений амплитуд напряжений логарифмически нормальным законом и функцией вида χ^2_{2n-1} нельзя отдать предпочтения ни той, ни другой кривой, что свидетельствует об условности выбора типа распределения. Использование теоретических распределений в задачах расчета долговечности увеличивает трудоемкость и не повышает точность расчетов; поэтому накопленное повреждение целесообразно определять по алгоритмам, независимым от гипотез о типе распределения, с использованием дискретных выборок.

г) Моделирование методом Монте-Карло большого числа кривых усталости, аппроксимированных степенным и экспоненциальным уравнениями, и определение относительных ошибок долговечностей при использовании тех же кривых показало, что расчет долговечности можно вести, пользуясь, как правило, любым из рассмотренных уравнений кривых усталости.

10. В результате сопоставления расчетных (при линейном суммировании повреждений и схематизации по укрупненным размахам) и экспериментальных величин средней долговечности элементов металлоконструкций показано следующее.

а) По данным эксплуатации и полигонных испытаний 376 натурных образцов несущих систем 18 марок машин распределение величин предельного накопленного повреждения A (для стадии появления макротрещин) удовлетворительно описывается логарифмически нормальным законом при A средневзв. $= 1,08$; вероятность ошибки расчета более чем в 2 раза составляет 0,1.

б) По данным испытаний на усталость 86 плоских образцов из стали 09Г2 с двухсторонним стыковым швом при трех программах симметричного нагружения распределение величин A удовлетворительно согласуется с логарифмически нормальным законом (для стадий трещинообразования и разрушения величины A средневзв. равны 1,02 и 0,92).

Рекомендована методика расчета средней долговечности сварных, литых и клепаных элементов несущих систем машин (нагруженность которых характеризуется значительным числом амплитуд напряжений, превышающих исходные пределы выносливости) на основе линейного

суммирования усталостных повреждений.

11. Установлено, что при расчете долговечности элементов металлоконструкций машин методы теории случайных функций и метод непосредственной схематизации записей по максимумам для рассмотренных примеров процессов нагружения с различным структурным и частотным составом дают результаты, соотношение которых лежит в диапазоне $0,36 \div 1,90$. Рекомендовано с осторожностью применять формулу (3), когда строго не доказано соответствие свойств случайных процессов нагружения тем свойствам, для которых она выведена.

Методами теории случайных функций возможно получить приемлемую по точности среднюю частоту процесса при использовании следующих методических правил: ограничение достоверного диапазона частот и выбор шага квантования процесса по теореме В.А.Котельникова; сглаживание спектральной плотности способом осреднения; применение численного интегрирования вместо численного дифференцирования.

12. Разработана методика выбора режимов полигонных испытаний, при которой обеспечивается совпадение максимальных амплитуд напряжений (в ответственных элементах конструкций) при ускоренных испытаниях и при выбранных типичных условиях эксплуатации (со смещением распределения амплитуд выбираемого режима испытаний в сторону больших напряжений); показана эффективность использования режимов "типичных циклов" нагружения, закономерно и многократно повторяющихся в эксплуатации. Принятая методика для подавляющего большинства испытанных объектов обеспечила идентичность вида, характера, последовательности появления и развития усталостных трещин на полигоне и в эксплуатации.

13. Экспериментально доказана возможность применения малого числа видов препятствий на треках полигонов для ресурсных испытаний несущих систем мобильных машин, что позволяет уменьшить стоимость сооружений. Рекомендовано высоту препятствий h выбирать в диапазоне $h_{cp} \div h_{cp} + 2S_h$ высот неровностей типичных участков плохих дорог, встречающихся в эксплуатации.

14. Разработана методика прогноза гамма-процентного ресурса деталей по результатам ускоренных испытаний, основанная на использовании величин $K_{пер}$ - коэффициента перехода и $\bar{R}_{гр} = R_{гр} \cdot R_{ср}$ - относительного гамма-процентного ресурса (при данном коэффициенте вариации V распределения). Обобщены значения коэффициентов V и $K_{пер}$ для большого числа объектов, испытанных на полигонах НАТИ. Для распределений ресурса деталей несущих систем в эксплуатации и при полигонных испытаниях получено $V = 0,16 \div 0,42$; V средневзв. $= 0,28$. Для одних и тех же деталей V экспл. всегда больше чем

У полиг.

15. Необходимым условием создания в короткие сроки несущих систем мобильных машин с требуемым ресурсом при минимальной металлоемкости является проведение расчетно-экспериментального комплекса исследований, состоящего из следующих основных этапов: 1) определение статистической характеристики использования машины и выбор типичных вариантов использования; 2) предварительный расчет статической прочности; 3) определение рядов распределений напряжений в деталях в выбранных условиях эксплуатации путем тензометрирования; 4) выбор режимов ускоренных ресурсных испытаний; 5) ускоренные (полигонные и стендовые) испытания до наступления предельного состояния несущих систем машин; 6) эксплуатационные испытания; 7) прогноз гамма-процентного ресурса и разработка рекомендаций о путях повышения ресурса слабых мест; 8) контрольные эксплуатационные и ускоренные испытания модернизированных образцов; определение достигнутого ресурса; 9) систематические ускоренные испытания с целью контроля фактической долговечности изделий серийного производства.

Эта система внедрена в практику отечественного тракторостроения. Ее принципы и методические основы являются общими для большинства деталей, работающих при случайном нагружении.

16. Разработаны правила рационального конструирования сварных узлов несущих систем. При заключительных этапах доводки представилось возможным при небольших изменениях конструкций несущих систем и незначительном увеличении веса обеспечить значительное повышение ресурса путем перераспределения металла и силовых потоков с учетом результатов исследований. Годовая экономическая эффективность по внедренным усиленным рамам машин составила 9 млн.руб.

X
X X

Материалы диссертации доложены на следующих конференциях, совещаниях и семинарах:

1. Всесоюзное совещание по механической усталости. Киев, 1964.
2. Семинар "Приборы и стенды для испытаний машин и узлов". Московский дом научно-техн. пропаганды, 1965.
3. Всесоюзная конференция по повышению надежности и долговечности машин и приборов. Москва, 1965.
4. Отраслевая научно-техническая конференция по повышению надежности тракторов и самоходных шасси, их агрегатов и узлов. Москва, 1965.

5. Совещание специалистов стран СЭВ по методам ускоренных испытаний долговечности тракторов и сельхозмашин. Лейпциг, 1965.

6. Симпозиум международной выставки "Современные сельхозмашины и оборудование". Москва, 1966.

7. Совещание специалистов стран СЭВ по методам ускоренных ресурсных испытаний и статистической оценки нагруженности тракторов и сельхозмашин. Одесса, 1968.

8. Семинар по вопросам прочности. МВТУ им.Н.Э.Баумана, 1970.

X
X X

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах, написанных или самостоятельно или в соавторстве:

I. Изучение причин поломок рамы трактора ДТ-54. "Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства" № 6, 1958.

2. О прочности рамы гусеничного трактора общего назначения. "Тракторы и сельхозмашины" № 4, 1959.

3. Расчет на прочность рам гусеничных тракторов с упругой подвеской. "Тракторы и сельхозмашины" № 11, 1960.

4. Ускоренные испытания машин за рубежом. "Тракторы и сельхозмашины" № 5, 1961.

5. Ускоренные испытания прочности тракторов на полигоне. "Тракторы и сельхозмашины" № 7, 1963.

6. Современные методы анализа напряженности конструкций при исследовании влияния скорости движения трактора. "Тракторы и сельхозмашины" № 3, 1964.

7. Ускоренные испытания прочности рам гусеничных тракторов. Труды НАТИ, вып.168, 1964.

8. Статистический анализ эксплуатационной напряженности и обоснование режима ускоренных полигонных испытаний рам. Труды НАТИ, вып.168, 1964.

9. Статистическая характеристика влияния скорости трактора на напряженность его несущей системы. Сборник докладов конференции по статистическим методам прочности в машиностроении, вып.3, НТО Машпром, 1964.

10. Тракторы и самоходные шасси на Брюссельской выставке. "Тракторы и сельхозмашины" № 8, 1964.

11. Применение электронных вычислительных машин при анализе выносливости деталей. "Вестник машиностроения" № 2, 1965.

12. Опыт ускоренных полигонных испытаний прочности тракторов, самоходных шасси и прицепов. Труды семинара "Приборы и стенды для испытаний машин и узлов", Моск.дом научно-техн.пропаганды, 1965.

13. Оценка усталостной прочности элементов конструкций на электронно-вычислительных машинах. "Известия АН Арм.ССР", серия техн.наук, т.ХУШ, № 1, 1965.

14. Влияние скорости движения трактора ДТ-75 на напряженность навесного устройства. "Тракторы и сельхозмашины" № 8, 1965.

15. Статистическая характеристика эксплуатационной напряженности автомобильных рам. "Автомобильная промышленность" № 1, 1966.

16. Оценка долговечности автомобильных рам. Труды НАМИ, вып. 80, 1965.

17. Ускоренные полигонные испытания грузовых автомобилей. "Автомобильная промышленность" № 2, 1966.

18. Исследование напряженности и оценка долговечности несущих конструкций колесных машин. "Известия ВУЗов СССР. Машиностроение", № 1, 1966.

19. Система исследований и ускоренных испытаний по обеспечению заданной долговечности несущих систем тракторов и других машин. "Стандарты и качество" № 4, 1966.

20. Современные методы ускоренных испытаний усталостной прочности тракторов и других машин. Доклады Международной выставки "Современные сельхозмашины и оборудование", Москва, 1966.

21. Исследование усталостной прочности тракторных прицепов. "Тракторы и сельхозмашины" № 6, 1966.

22. Долговечность рамы скоростного гусеничного трактора. "Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства" № 7, 1966.

23. Прогноз долговечности новых и модернизированных моделей несущих систем тракторов, самоходных шасси, прицепов и других машин. Сб. "Надежность и долговечность машин и тракторов", вып.3, Труды Всесоюзной конференции по повышению надежности и долговечности машин и приборов. НИИМАШ, 1966.

24. Ускоренные испытания и тензометрические исследования напряженности несущих систем тракторов и других машин. Труды конференции по повышению надежности тракторов, ч.3, ОНТИ НАТИ, 1966.

25. Усталостная прочность несущих систем колесных тракторов-тягачей К-700 и Т-125. Труды конференции по повышению надежности тракторов, ч.3, ОНТИ НАТИ, 1966.

26. Тензометрическое исследование напряженности и ускоренные полигонные испытания прочности несущей системы трактора Т-4. Труды

конференции молодых ученых Таджикистана. Изд. "Ирфон", Душанбе, 1966.

27. Современные методы ускоренных испытаний машин на сопротивление усталости. "Вестник машиностроения" № 2, 1967.

28. Режим ускоренных испытаний несущей системы колесного трактора. "Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства" № 7, 1967.

29. Некоторые особенности усталостных испытаний автомобилей и других машин на полигонах. "Автомобильная промышленность" № 8, 1967.

30. Опыт повышения усталостной прочности контейнерных прицепов. "Тракторы и сельхозмашины" № 9, 1967.

31. К вопросу о длительности тензометрирования автомобильных рам. "Известия ВУЗов СССР. Машиностроение" № 6, 1967.

32. Методы ускоренных испытаний несущих систем тракторов и других машин. Труды совещания по методам ускоренных испытаний надежности и долговечности деталей, узлов и машин. НИИМАШ, Москва, 1967.

33. Напряженность элементов навесного устройства в зависимости от скорости трактора. Труды ЧИМЭСХ, вып. 28, 1967.

34. Опыт повышения долговечности несущей системы полуприцепа ОДАЗ-885. "Автомобильная промышленность" № 2, 1968.

35. Конструирование сварных рам тракторов. "Тракторы и сельхозмашины" № 3, 1968.

36. Влияние скорости движения и величины перевозимого груза на напряженность несущей системы самоходного шасси. "Известия ВУЗов СССР. Машиностроение" № 1, 1968.

37. О влиянии технологических факторов на долговечность конструкций. "Стандарты и качество" № 2, 1968.

38. Ускоренные ресурсные испытания в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении. "Международный сельскохозяйственный журнал" № 3, 1968.

39. Особенности учета неровности пути при оценке нагруженности несущих систем автомобилей и других машин. "Автомобильная промышленность" № 5, 1968.

40. Коэффициенты динамичности и корреляционные зависимости между нагрузками и напряжениями. "Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства" № 7, 1968.

41. Режим полигонных испытаний промышленного трактора. "Тракторы и сельхозмашины" № 10, 1968.

42. Методика статистического анализа переменной нагруженности деталей. Труды НАТИ, вып. 195, 1968.

43. О длительности полигонных ресурсных испытаний несущих систем. Труды НАТИ, вып. 195, 1968.

44. Методы схематизации процессов нагружения деталей. Труды НАТИ, вып.195, 1968.

45. Устройства для обработки информации о нагруженности деталей. Труды НАТИ, вып.195, 1968.

46. О выборе верхней и нижней границы суммирования повреждений при расчетной оценке усталостной прочности. "Известия АН Арм. ССР", серия техн.наук, т.XXI, № 5, 1968.

47. Выбор полосы пропускания акселерометров при исследованиях нагруженности машин. "Известия ВУЗов СССР. Машиностроение" № 10, 1968.

48. О ресурсе сварных конструкций рам тракторов, прицепов и других машин. "Сварочное производство" № 10, 1968.

49. Исследование усталостной прочности большегрузных тракторных прицепов. "Тракторы и сельхозмашины" № 3, 1969.

50. Трек для ускоренных испытаний прочности бульдозеров. "Строительные и дорожные машины" № 3, 1969.

51. Прибор для статистической обработки записей нагруженности деталей. "Измерительная техника" № 3, 1969.

52. Использование эмпирических распределений амплитуд напряжений для расчета накопленного повреждения. "Вестник машиностроения" № 5, 1969.

53. Опыт конструирования и расчета сварных рам тракторов К-700. "Тракторы и сельхозмашины" № 6, 1969.

54. Методы ускоренных испытаний тракторов и сельхозмашин. "Тракторы и сельхозмашины" № 7, 1969.

55. Опыт повышения долговечности сварной несущей системы самосходного шасси СШ-75. "Тракторы и сельхозмашины" № 1, 1970.

56. Об уравнениях кривых усталости. "Вестник машиностроения" № 9, 1970.

57. Опыт расчета усталостной долговечности металлоконструкций тракторов и других машин. "Тракторы и сельхозмашины" № 2, 1971.

58. Расчет усталостной долговечности деталей с использованием различных методов информации о нагруженности. "Вестник машиностроения" № 3, 1971.

59. Авторское свидетельство № 123852 "Скрепление элементов рам тракторов". "Бюллетень изобретений" № 21, 1959.

60. Авторское свидетельство № 131233 "Рама гусеничного трактора". "Бюллетень изобретений" № 16, 1960.

61. Авторское свидетельство № 253598 "Рама тележки гусеничного двигателя трактора". "Бюллетень изобретений и открытий" № 30, 1969.